

CONTÊINER DE CONCRETO PARA ACONDICIONAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS: METODOLOGIA CONVENCIONAL E IMPRESSÃO 3D

Lídia Nara A.¹, Jamile.S.Fuína², Clédola O Tello³,Diego J. Rosa²

^{1,3} Centro de Desenvolvimento
da Tecnologia Nuclear
Av. Presidente Antônio Carlos
6627
Campus UFMG - Pampulha
31270-901- Belo Horizonte,
MG, Brazil
lidia.severo@cdtn.br
tellocc@cdtn.br

² FUMEC, Belo Horizonte
Rua Cobre 200
30.310-190-Belo Horizonte
MG, Brazil
jamile@fumec.br
diegorosa@fumec.br

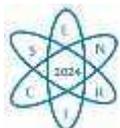
Palavras-Chave: Repositório; Rejeitos radioativos; Contêiner de concreto; Impressão 3D.

RESUMO

Para gerir adequadamente os rejeitos radioativos, eles devem ser tratados e acondicionados para que possam ser armazenados com segurança em repositório durante tempo suficiente para que os radionuclídeos decaiam até o nível natural. Essas barreiras são preparadas com materiais naturais e de engenharia. Um deles é o recipiente de concreto para acondicionar os resíduos em pacotes. O contêiner é a segunda barreira de todo o sistema. Este estudo propõe a produção de um protótipo do recipiente de concreto para acondicionar os pacotes de resíduos radioativos para que possam ser descartados em CENTENA. Além de propor a aplicação da tecnologia de manufatura aditiva realizando a impressão 3D do artefato de concreto e posteriormente realizar uma comparação dos métodos convencionais com a tecnologia. A Comissão Brasileira de Energia Nuclear (CNEN) elaborou um conjunto de regulamentos para a gestão de resíduos. Para a execução deste projeto foi seguido o documento normativo CNEN NN 6.09, principalmente para o desenvolvimento do projeto estrutural.

1. INTRODUÇÃO

O aumento populacional tem exigido ampliação da oferta de energia que pode ser gerada por carvão, gás natural e nuclear, tais materiais em seu processamento geram rejeitos radioativos. Para garantir que o uso da energia nuclear seja realizado com responsabilidade ambiental é necessária a construção de um repositório para armazenamento de rejeitos radioativos. O projeto CENTENA (Centro Tecnológico Nuclear e ambiental) é destinado ao desenvolvimento tecnológico na área de gerência de rejeitos e meio ambiente visa implementar o repositório que armazenará os rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação produzidos no país, levando em consideração os requisitos das normas das entidades reguladoras. A deposição será feita rente à superfície através de um sistema de barreiras múltiplas, onde existem barreiras naturais com camadas de solo e argila e barreiras de engenharia, que são objeto de estudo neste artigo, o recipiente de concreto.



Utilizado em outros países, como na Espanha, em El Cbril, o contêiner de concreto se destaca por ter maior resistência às intempéries e evitar a liberação de radiação, além de permitir a padronização para o acondicionamento de diversos resíduos. No Brasil, estudos anteriores propõem a utilização de concreto autoadensável de alto desempenho, reforçado com fibras de aço, na preparação desses recipientes, por apresentarem alta resistência mecânica.

O objetivo é propor e produzir um protótipo de contêiner de concreto para acondicionar as embalagens de rejeitos radioativos para que possam ser descartados na CENTENA, e aplicar a tecnologia da manufatura aditiva proporcionando uma maior agilidade no processo produtivo e visando aumentar a segurança e garantir a contenção dos rejeitos por longo período, evitando o impacto ambiental, minimizando o risco de contaminação do solo e da água.

O repositório brasileiro terá como conceito , o acondicionamento de resíduos em tambores, os mesmos serão distribuídos nos contêineres que serão depositados em uma base de concreto, e sua cobertura final com barreiras naturais conforme Fig.1.

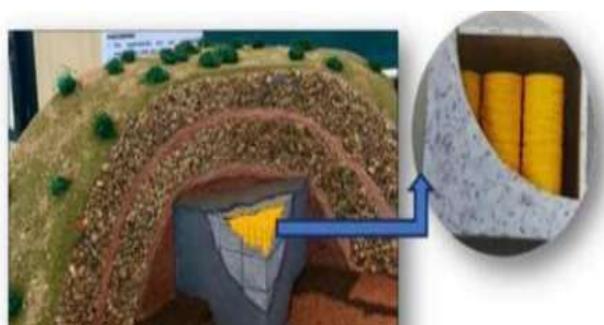


Fig. 1. Contêiner de concreto.

A Comissão Brasileira de Energia Nuclear (CNEN) elaborou um conjunto de regulamentos para o gestão de resíduos. O documento normativo CNEN NN 6.09 (2002) foi seguido para a execução deste projeto, principalmente para o desenvolvimento do projeto estrutural. Ele define o parâmetros para composição do recipiente, especificando a espessura mínima de 10 cm e a recobrimento mínimo de concreto de 4 cm para a armadura de aço, contribuindo para resultados precisos. O documento normativo CNEN NN 8.02 (2014) dispõe sobre procedimentos operacionais para o licenciamento de repositórios, incluindo aprovação de local, autorização de construção e operação, visando a segurança. O documento normativo CNEN NN 8.01 (2014) estabelece requisitos para a gestão de resíduos, visando garantir a segurança e o meio ambiente proteção.

Levando em consideração o tipo de repositório que será construído no projeto CENTENA é aplicado o conceito de múltiplas barreiras no gerenciamento de rejeitos radioativos, esse conceito envolve elementos naturais de engenharia, as barreiras naturais geralmente são constituídas por solo, rocha entre outros, já as barreiras de engenharia são construídas com outros materiais.

Um modelo a ser seguido é o da Eslováquia conforme Fig.2 que também trata-se de um repositório próximo a superfície e neste a primeira barreira de todo o sistema é o contêiner de concreto ^[1]. Neste modelo o concreto utilizado é de alta performance reforçado com fibras.

A estrutura do contêiner utilizado na Eslováquia é composta por caixa e tampa, para movimentação e deslocamento a mesa possui aberturas. Elas foram feitas a partir de moldes de aço. Para sua cura completa e desforma o período aguardado é de 16 horas ^[1].

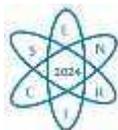


Fig. 2. Modelo de contêiner da Eslováquia.

A metodologia de execução convencional do contêiner foi adotada em vários países como a Eslováquia exemplificada na Fig 2. Porém esse trabalho visa acrescentar a possibilidade da execução na metodologia impressão de concreto em 3D.

A manufatura aditiva move-se no mesmo sentido da indústria 4.0. Para exemplificar a manufatura aditiva pode-se citar a impressão 3D em Concreto, que permite uma maior liberdade de criação, utilizando-se de formas geométricas mais complexas, tendo como ponto positivo um maior controle da qualidade e um menor desperdício do material.

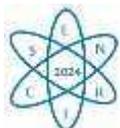
O funcionamento da impressão 3D necessita de uma representação geométrica computacional para a efetiva impressão de uma estrutura tridimensional ^[2]. Para executar tais representações existem softwares de modelagem que auxiliam na criação dos objetos em 3D os mais relevantes são: Cura, Slic3r, 3D Slash .

Para se iniciar o processo de impressão dos elementos em 3D o modelo deve estar previamente modelado e estruturado. Por meio dos softwares citados o objeto será dividido em camadas e a quantidade vai estar relacionada as dimensões, materiais e complexidade do modelo. A impressão se dá por camadas até formar o objeto por completo, este processo pode levar horas. O preparo da impressora é primordial para o sucesso do processo, ou seja, além de uma configuração adequada, a seleção e abastecimento de material adequado para utilização no protótipo, e garantir a sincronização do conjunto, do hardware (impressora) e software (programa com modelagem) para atingir resultados precisos.

Vários projetos de construção aditiva foram desenvolvidos , baseados no conceito de manufatura aditiva , dentre eles, a D-Shape , a construção por contorno (Contour Crafting, em inglês) e a impressão 3D em concreto (3D Concrete Printing - 3DCP, em inglês) ^[3]. Existem vantagens relevantes desses processos em relação a construção convencional. ^[4]

2 METODOLOGIA

A análise estrutural de contentores de concreto armado é realizada através do software SAP2000, um programa de elementos finitos que permite simular o comportamento das estruturas sob as cargas envolvidas e obter as tensões, deformações e deformações a que estão submetidas. Os resultados obtidos no programa são a base para o projeto dos containers.



As dimensões do container podem ser observadas na Fig .3 e foram definidas com base na quantidade e dimensões dos tambores que serão condicionado dentro dele. Neste caso, são selecionados tambores com diâmetro de 63 cm e altura de 93 cm. A Figura 3 mostra as dimensões dos recipientes e a disposição dos tambores dentro deles

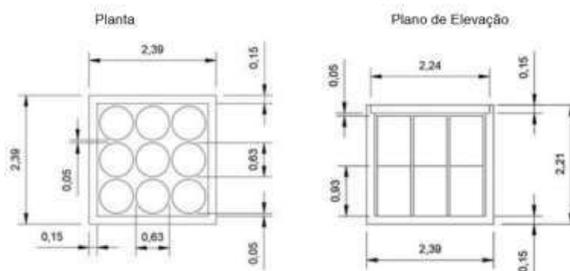


Fig. 3. Disposições dos tambores no contêiner e suas dimensões.

Este estudo preliminar tem como objetivo caracterizar o comportamento de três diferentes designs de mistura de concreto (rico, médio e pobre) para o condicionamento de rejeitos radioativos de baixo e intermediário níveis de atividade. A caracterização incluiu:
Análise agregada: realizada conforme documentos normativos da ABNT para determinação de granulometria, forma, textura e propriedades físicas.

Seleção do cimento: foi escolhido o cimento Portland CP V-ARI, que possui alta resistência
Aditivo superplastificante: utilizado para aumentar a trabalhabilidade do concreto e permitir a concretagem sem vibração, otimizando o processo
Dimensionamento de mistura de concreto: baseado no método IBRACON ^[5], com três misturas de diferentes proporções de cimento , água e agregados.

Ensaio de caracterização: realizados conforme documentos normativos da ABNT, incluindo:

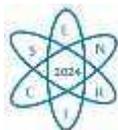
Slump test: avalia a consistência do concreto fresco (NBR 1583-2) ^[6]

Moldagem de corpos de prova: para testes de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral (NBR 5738) ^[9]

Cura dos corpos de prova: por 28 dias em ambiente úmido, conforme NBR 5738. ^[6]

Ensaio de resistência à compressão: determina a capacidade do concreto em suportar cargas compressivas (NBR 5739) ^[7]

Ensaio de resistência à tração: avalia a resistência à tração indireta do concreto (NBR 7222). ^[8]



3 RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão e tração aos 28 dias de cura são apresentados na Tabela 1 para o doseamento selecionado.

- A mistura A apresentou a maior resistência à compressão (74,1 MPa), seguida pelas misturas B (56,7 MPa) e C (49,8MPa).
- A resistência à tração por compressão diametral seguiu a mesma ordem, com valores de 7,0 MPa, 4,6 MPa, e 3,9 MPa para as misturas A, B e C, respectivamente.
- O módulo de elasticidade variou de 43.675 MPa (mistura A) a 30.950 MPa (mistura C).

Tabela1- Resultados de ensaios mecânicos

Mistura	Resistência à Compressão (MPa)				Resistência à tração (MPa)				Módulo de Elasticidade (MPa)
	Individual			Significar	Individual			Significar	
A	82,7	69,2	70,6	74,1	7,5	6,1	7,4	7,0	43.675
B	54	54	63	56,7	4,4	5,0	4,6	4,6	32.550
C	50	49	50	49,8	3,5	4,4	3,9	3,9	30.950

Embora os resultados sejam promissores, de acordo com a Tab 1 é importante destacar que este é um estudo preliminar com um número limitado de amostras (três por idade). Estudos adicionais com maior número de amostras e diferentes tempos de cura e misturas mais adequadas serão realizados para:

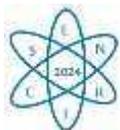
- confirmar as tendências observadas,
- avaliar a influência de outros fatores, como a relação água/cimento e o tipo de agregados e superplastificante,
- analisar a durabilidade do concreto em ambientes agressivos

Este estudo contribui para o desenvolvimento de concretos otimizados para recipientes de resíduos radioativos com potencial para:

- aumentar a segurança, garantindo a contenção de resíduos por um longo período de tempo,
- reduzir o impacto ambiental, minimizando o risco de contaminação do solo e da água,
- otimizar o processo produtivo, reduzindo custos e tempo de construção.

Cada fase de carregamento é analisada estruturalmente. desde a fabricação do container até sua colocação no módulo (repositório). A primeira fase consiste em içar o recipiente vazio até ao local onde será enchido. A segunda fase consiste no enchimento do contentor com tambores, seguido do seu envolvimento com argamassa e, em seguida, do seu fecho com laje de betão armado. A terceira fase corresponde ao levantamento do contêiner cheio, e a quarta fase é a sua disposição no repositório, onde receberá a sobrecarga dos demais contêineres.

A análise de todas essas fases requer atenção ao fenômeno da retração do concreto, do impulso da argamassa nas paredes do contêiner (segunda fase), do peso próprio de todas as estruturas



envolvidas e das tensões induzidas de tração, cisalhamento e compressão, que variam durante as fases, tanto em intensidade quanto em localização.

Para realizar o projeto do container são criadas diversas planilhas que consideram todos os parâmetros citados acima, bem como aqueles relacionados aos materiais adotados (módulo de elasticidade, resistência à compressão, limite de abertura de fissuras, cobrimento de armadura, fatores de segurança, entre outros). Essas planilhas são elaboradas utilizando as formulações definidas pelas normas da ABNT.

Para os resultados em impressão 3D definiu-se através de revisão bibliográfica e levando em consideração os valores necessários de resistências mecânicas segundo CNEN NN 6.09^[10] o material para ser impresso conforme Tab.2 :

Tabela 2- Materiais para impressão 3D

Materiais	Proporções
cimento cpv	
Cinza volante pozo fly	28,62%
sílica ativa diprotec	14,82%
areia martins lanna	x2
Superplastificante Masterglenium 51 da NTC BRASIL	1,42%
Aditivo celulósico Celotex HEC 100MH da Aditex	0,28

Após a definição do material a ser utilizado para impressão definiu-se o formato de um bloco com as dimensões 30x80x15 a ser impresso de forma maciça para obtenção de corpos de prova de 10x20 conforme Fig. 4, e realização de ensaios de resistências e realização do comparativo dos resultados da metodologia tradicional.

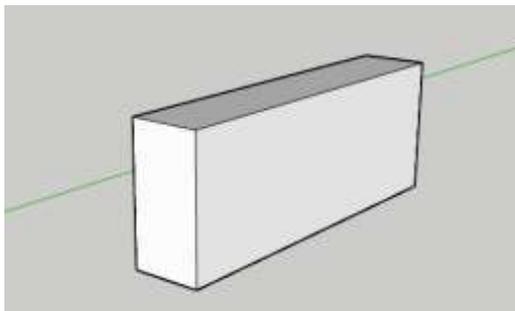
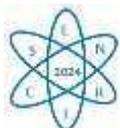


Figura 4: Bloco para impressão 3D de corpos de prova

Definiu-se que a princípio a impressão do artefato seria em escala menor que o tradicional para verificar se as camadas de impressão poderiam alterar os resultados de resistência segue a imagem do projeto realizado para escala de latas de 3.600 ml que representam os tambores de 200 l em escala normal .

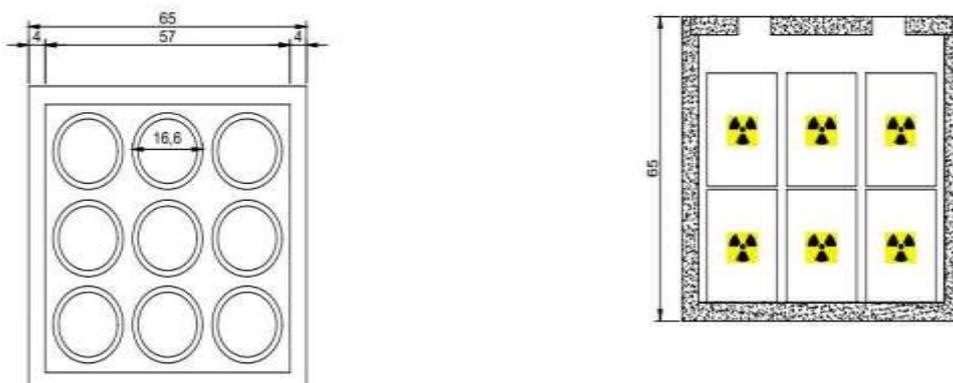
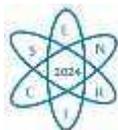


Figura 5: Protótipo em escala menor

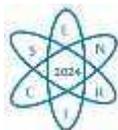
4 CONCLUSÃO

Após a realização dos estudos numéricos e experimentais, pretende-se construir um protótipo que permita verificar os parâmetros adotados. Tal validação é de suma importância para que os contêineres sejam construídos com segurança em todas as fases de carregamento. Os materiais da metodologia convencional até então testados demonstram uma tendência a resultados satisfatórios sendo ainda necessário uma réplica para verificação de resultados. Os modelos para o 3D estão aguardando suas impressões dos corpos de prova para realização dos ensaios e comparações com os modelos convencionais verificando as vantagens e desvantagens dos mesmos. Com relação aos ensaios mecânicos do modelo convencional nota-se uma tendência de valores considerados positivos pois se encontram dentro da faixa determinada pela NN CNEN 6.09 .



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUDOBA, I. GRESLÍK, P. High performance fibre reinforced concrete as attractive material for container production in radioactive waste management. In: Symposium Keep Concrete Attractive, 2005, Budapeste
- [2] TROTT, Paul. Gestão da inovação e desenvolvimento de novos produtos. 4 ed. São Paulo: Bookman, 2012
- [3] Labonnote, N.; Rønquist, A.; Manum, B.; & Rütther, P. (2016). Additive construction: stateofthe-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347-366.
- [4] Florêncio, E. Q.; Quintella, I. P. C. P.; & Ferreira, D. B. (2016). O futuro do processo construtivo? A impressão 3D em concreto e seu impacto na concepção e produção da arquitetura. XX Congresso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 9-11.
- [5] P. R. L. Helene, “Concreto: tecnologia e dosagem”, PINI, São Paulo, Brazil (2011).
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015. Versão corrigida: 2016.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018^a
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011^a
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto autoadensável. Partes 1 a 6. Rio de Janeiro, 2017b
- [10] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NN-6.09: critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação. Rio de Janeiro, 2002.
- [11] P. R. L. Helene, “Concreto: tecnologia e dosagem”, PINI, São Paulo, Brazil (2011).
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015. Versão corrigida: 2016.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018^a
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011^a
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto autoadensável. Partes 1 a 6. Rio de Janeiro, 2017b
- [16] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NN-6.09: critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação. Rio de Janeiro, 2002.



- [17] P. R. L. Helene, “Concreto: tecnologia e dosagem”, PINI, São Paulo, Brazil (2011).
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2015. Versão corrigida: 2016.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018^a
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Argamassa e concreto - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011^a
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto autoadensável. Partes 1 a 6. Rio de Janeiro, 2017^b
- [22] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NN-6.09: critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio nível de radiação. Rio de Janeiro, 2002.